

doi: 10.11720/wtyht.2021.0201

封志兵, 聂冰峰, 聂逢君, 等. 地球物理方法在砂岩型铀矿勘查中的应用进展[J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1179-1188. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.0201>

Feng Z B, Nie B F, Nie F J, et al. Application progress of geophysical methods in exploration of sandstone-type uranium deposit [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5): 1179-1188. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.0201>

地球物理方法在砂岩型铀矿勘查中的应用进展

封志兵^{1,2,3}, 聂冰峰², 聂逢君³, 江丽², 夏菲³, 李满根³, 严兆彬³,
何剑锋¹, 程若丹²

(1. 东华理工大学 江西省放射性地学大数据技术工程实验室, 江西 南昌 330013; 2. 东华理工大学 地球物理与测控技术学院, 江西 南昌 330013; 3. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: 砂岩型铀矿是当今我国铀矿勘探的主要类型。地球物理方法在沉积盆地油气、煤等能源矿产勘查中得到广泛应用, 其在同盆产出的砂岩型铀矿找矿与勘探中理应承担重任。文章从砂岩型铀矿成矿理论和控矿因素出发, 结合勘探实际情况, 探讨各地球物理方法的应用现状、存在问题和发展趋势。在实际应用中, 地球物理测井在直接定位铀矿和定量计算平米铀含量等方面发挥重要作用, 地面地球物理方法在查明沉积建造、断裂、地质体岩性和基底起伏等铀成矿环境方面有优势。为确保地球物理方法的应用效果, 需要在方法选择、测线布置、数据解释和解释等全过程紧密结合已有地质信息, 还需根据勘探实际情况选择相适应的地球物理方法(组合)。文章强调, 重磁勘探可为盆地内部有利勘探区的优选和后期地质、地球物理勘探工作的布置提供依据, 应在此类铀矿找矿与勘探前期工作中得到足够的重视。

关键词: 砂岩型铀矿; 放射性勘查; 地球物理方法; 层间氧化带

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2021)05-1179-10

0 引言

铀资源是重要的战略资源, 兼备军用、民用双重属性^[1]。因地浸开采砂岩型铀矿的成本低且环境友好, 砂岩型铀矿已成为当今铀矿勘探的主要类型^[2]。我国已在伊犁盆地、鄂尔多斯盆地、二连盆地、松辽盆地西南部等地探明一系列砂岩型铀矿^[3-6]。近年, 又在松辽盆地西南部大林地区、鄂尔多斯盆地塔然高勒地区等地取得铀矿找矿新突破^[7-8], 表明此类铀矿具有良好的继续找矿与勘探前景。

地球物理勘查方法在沉积盆地能源矿产勘查中

扮演着重要角色^[9-10], 其在同盆产出的砂岩型铀矿这一热点资源的勘探中理应承担重任。近年来, 铀矿勘探人员将重、磁、电、震、放射性等地球物理方法应用在砂岩型铀矿找矿与勘探中, 在查明铀成矿相关的沉积建造、断裂和基底起伏等方面取得一定成效^[11-15]。然而, 由于表征于地表的找矿信息十分微弱, 且铀储层物性差异不明显, 在一定程度上限制了地面地球物理方法在此类铀矿床找矿与勘探中的应用推广^[16]。鉴于此, 笔者在分析砂岩型铀矿控矿因素的基础上, 综合大量野外实际工作和前人研究成果, 系统地阐述各地球物理方法在此类铀矿找矿与勘探中的应用现状以及存在问题, 进而讨论各方法的发展趋势以及此类铀矿勘查方法(组合), 以期对砂岩型铀矿勘探提供有益借鉴。

收稿日期: 2021-04-08; 修回日期: 2021-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2067202, 41862010, 42072099); 江西省教育厅科技计划项目(GJJ170480); 江西省放射性地学大数据技术工程实验室开放基金项目(JELRGBDT202007); 中核集团龙灿工程科研项目(地 LCEQ01); 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室开放基金项目(NRE1809)

第一作者: 封志兵(1989-), 男, 江西临川人, 博士, 从事砂岩型铀矿成矿作用与探测技术研究工作。Email: zbfengjl@163.com

通讯作者: 聂逢君(1962-), 男, 湖南祁阳人, 博士(后), 教授, 从事砂岩型铀矿成矿作用研究工作。Email: niefj@263.net

1 砂岩型铀矿成矿

砂岩型铀矿的形成是水—岩相互作用的结果^[17]。根据砂岩型铀矿成矿理论,处于高地势的富铀岩体遭受长期风化剥蚀,其中的铀被氧化并溶于大气降水中形成含铀—氧流体。含铀—氧流体在重力驱动下流向低地势处并渗入到地层中。当含铀—氧流体侧向渗入到地层中并发生层间氧化作用时,铀在氧化—还原过渡带聚集并形成卷状为主的铀矿体,该成矿模式被称为层间氧化式砂岩型铀矿^[18-19]。当含铀—氧流体在低地势处垂向渗入到下伏地层中并发生潜水氧化作用,由此形成板状为主的铀矿体,该成矿模式被称为潜水氧化式砂岩型铀矿^[20-21]。除上述表生流体成矿之外,深源流体(烃类流体、热流体等)叠加成矿也愈加得到关注^[22-25]。

次造山运动、铀源、断裂、沉积建造、基底起伏等是砂岩型铀矿成矿的控制因素^[11,26-29],其中,次造山运动是触发铀成矿作用的驱动力,其不仅支配含矿层砂体的堆积和含铀—氧流体的运移,还可能造成矿区内断裂的形成。自中生代以来,我国北方经历复杂的构造活动,以至于此类铀矿往往存在多期次叠加成矿的特点,已探明的砂岩型铀矿多产出在邻近酸性火成岩的区域。隆起区花岗岩因富含铀而被视为良好的铀源,酸性火山岩次之^[23,30-31]。现有勘探成果表明,在铀矿区附近多发育深切基底的区域/局部断裂^[27],这些断裂可作为地下水的排泄区,也可作为联接深部烃类流体、热流体等的通道^[32]。深部油气通过断裂迁移至含矿目的层,为铀成矿提供还原剂。有学者指出,在产于我国中—东北部的铀矿区发育强烈的热流体蚀变现象,尤其是松辽盆地西南部,铀矿区的断裂和辉绿岩十分发育,铀矿产出在断裂和辉绿岩附近^[24,33]。统计表明,辫状河及辫状河三角洲沉积形成的砂体是良好的铀储集场所。另外,含铀目的层及其邻近层位的岩性和岩相变化控制铀的空间定位,铀矿化通常发育在沉积相变、碎屑岩粒度减小的位置。近年来,基底起伏对铀成矿的控制作用得到关注^[29],基底起伏控制上覆地层的沉积建造和地下水的流动方向,进而影响铀的聚集和产出位置。历史时期出露地表的基底隆起也可能为铀成矿提供部分铀。

2 放射性勘查

长期以来,放射性勘查是铀矿找矿与勘探的重

要手段。自 20 世纪 50 年代以来,利用航空和地面 γ 总道/能谱测量等方法在我国华南地区发现了一批(特)大型花岗岩型、火山岩型铀矿床^[34]。这些铀矿床的品位高且多产于近地表,表征于地表的有效信号强,采用相对简单的数据处理方法(如平均值加 3 倍均方差)即可圈定有利勘探区,且找矿效果好^[35]。目前,面向铀矿的放射性勘查方法主要有 γ 能谱测量、 α 及其子体测量等^[36-38]。 γ 能谱测量测定的是地表岩石、土壤以及矿石中放射性元素衰变所释放的 γ 射线强度^[39]。该方法在野外实施中效率高且较为经济,适合大范围开展。然而, γ 射线在地层和岩体中穿透能力有限。对于具有一定产出深度的砂岩型铀矿,在地表能够采集到的有用信息十分微弱,易湮没于背景噪声中,限制了 γ 能谱测量方法查找此类铀矿的应用效果。但是, γ 能谱测量可应用于查明铀成矿环境。利用该方法测量铀源区铀、钍等的含量,并根据有关公式估算原始铀含量和铀的丢失率,据此评价潜在铀源区铀的丢失情况^[40]。另外,该方法在查明地下断裂方面具有一定效果,与电(磁)法、地震勘探等方法(组合)可查明有利勘探区断裂展布情况。 α 是镭的第一代衰变子体,直接反映镭的存在特征。埋藏在深部的铀矿体经衰变和迁移在一定范围内形成 α 及其子体“地球化学晕”,故测量 α 及其子体异常值以提取深部铀成矿信息被寄予厚望。近年,有关学者在各产铀盆地开展了大量的 α 及其子体异常测量的试验研究工作并取得一定效果,具体方法包括活性炭测 α 法、土壤天然热释光法、 ^{210}Po 法及 ^{218}Po 法等^[36]。研究发现,砂岩型铀矿卷状铀矿体的首、尾部铀镭平衡严重偏镭, α 及其子体异常测量结果表现为高值;而内部铀镭平衡严重偏铀,其测量结果表现为低值^[41]。然而,影响其测量结果的因素多样,除地形、覆盖层厚度和性质之外,还受泥岩顶板空间展布等的影响。以二连盆地 EG 地区为例,胡航等发现铀矿化顶部隔水层不发育的部位往往出现异常高值,但在工业铀矿顶部隔水层发育的部位却无法测量到异常高值^[37]。

为有效提高放射性勘查方法在砂岩型铀矿的找矿效果,需要在以下 3 方面得到改进和发展:① 发展数据处理技术,降低各因素对测量结果的影响,以有效识别和提取湮没在背景噪声中铀矿相关的有用信息。目前,多是利用数理统计与分析的有关方法对放射性勘查方法测量获得的数据进行处理。其数据处理方法较简单,难以满足深源、强背景噪声干扰下有效信息提取的需求。因此,有必要从各影响因

素特点出发来选择相应的数据处理技术。赵宁博等采用子区中位数衬值滤波法来处理氡浓度数据,在一定程度上压制了地形的影响^[42]。② 加强氡及其子体测量方法的理论研究。氡气是在对流、扩散和地热等的作用下迁移至地表。然而,在地质找矿工作中有实际意义的氡同位素²²²Rn的半衰期只有3.825 d,无法在短时间内迁移至地表^[43]。有关学者对氡的迁移机制提出了不同看法,包括:地下水驱动的“多棒接力传递”、地气流传递作用和氡及其子体的团簇现象等。对氡的迁移机制认识的不统一,在一定程度上限制了方法的发展^[43]。③ 改进老方法、发展新技术。目前,面向铀矿的主流放射性勘查方法(γ 能谱测量、氡及其子体测量等)是20世纪面向硬岩型铀矿发明和发展起来的。加之有关数据处理方法不是以砂岩型铀矿为对象,因此,现有放射性勘查和数据处理方法在砂岩型铀矿勘查中存在一些不适性。有必要以砂岩型铀矿为对象,基于其成矿特征,改进放射性勘查方法和探测设备,并研发新方法和设备。另外,放射性勘查方法也可应用于其他能源矿产以及水工环等领域^[34]。积极推动放射性勘查方法在其他领域的应用,并在实践中发展和完善,进而提升该方法在砂岩型铀矿中的应用效果。

3 常规地球物理勘查方法

3.1 地球物理测井

地球物理测井测量的是岩石物性参数(包括自然伽马、视电阻率、自然电位、声波、井径等)在垂向上的变化^[44],避免了地面地球物理勘查方法测得数据普遍存在的弱有效信号,强背景噪声干扰的问题。因此,地球物理测井是砂岩型铀矿勘探中应用最普遍的地球物理方法。其中,利用测井数据定量计算平米铀含量、确定含矿层的厚度和埋深等是铀矿勘探与开发的核心内容^[44]。然而,现今广泛应用的自然 γ 测井方法并非“直接铀定量”的方法,而是测量铀系 γ 射线总量或能谱,其结果受铀—镭平衡、氡气逸出等的影响较大,需要开展相应的校正以降低影响^[45]。近年,东华理工大学汤彬教授致力于“直接测铀”的铀裂变瞬发中子测井技术,并已取得理想成效^[45]。地球物理测井方法在查明成矿环境方面也表现得十分突出^[6]。处于不同沉积环境的岩石,其粒度、矿物成分以及孔隙度等会有所差别,物性参数也会随之发生改变。视电阻率、自然电位、声波、井径等物性参数对不同性质的岩石响应不一。在砂岩型铀矿勘探中,视电阻率曲线是岩性确定、地

层划分的主要参考^[6];自然电位曲线可用于确定泥岩基线和区分渗透/非渗透层等^[46],对含矿层岩性的精细解释、后期的地浸开采等有一定参考价值。笔者曾在二连盆地巴彦乌拉拉矿床开展测井资料的地质解释工作,岩石的岩性变化与视电阻率测井曲线变化高度吻合。另外,测井相分析也是重要的研究内容。测井相是一组测井响应特征(幅度、形态特征等)的总和,可结合岩心岩性等地质资料,解释其指代的沉积相^[6]。张成勇等利用二连盆地巴彦乌拉拉矿区的电测井曲线分析了区内沉积(微)相特征,指出目的层赛汉组为辫状河沉积,含矿砂体具有厚度大、胶结物少和孔渗性好等特点,有利于地下水的径流和铀的聚集成矿^[6]。此外,还有学者根据砂岩型铀矿成矿特征,联合多种测井曲线来揭示其成矿信息。王卫国等将二连盆地乌尼特地段铀矿勘探 γ 测井曲线与视电阻率测井曲线对比,在识别目的层砂体的基础上,结合 γ 测井曲线,大致划定氧化带和氧化—还原过渡带的分布范围^[46]。尽管地球物理测井在砂岩型铀矿勘探中占有重要地位,但与油气测井相比,尚有长足的发展空间。目前,除利用自然 γ 测井数据定量解释铀含量等之外,地球物理测井资料的地质解译还处于定性—半定量解译的状态,如何较准确地计算铀成矿相关的矿物含量、孔渗性等是今后发展的方向。

近年,盆内油、煤与铀兼探的找矿思路得到足够重视^[47]。因铀的聚集成矿需要一定量的有机质,在一些产铀区含铀层与煤层相邻或为同一层位^[5],十分有利于煤铀兼探工作的开展。其中,往年积累的煤田测井资料可在煤铀兼探中起到重要作用。在伊犁盆地南缘、鄂尔多斯盆地大营地区等发现的(特)大型砂岩型铀矿是通过分析往年积累的煤田测井资料发现的。煤田测井资料的 γ 测井数据可作为确定铀异常存在与否的重要参考,其他参数的测井数据也可用于分析铀成矿环境。因此,在砂岩型铀矿有利勘探区优选工作中应足够重视煤田测井数据的分析。

3.2 地震勘探

地震勘探在沉积盆地能源矿产勘查中发挥着重要作用,其优势在于具有高分辨率且探测深度大^[10]。目前,该方法主要被应用于地层划分和岩性、岩相、断裂以及其他典型地质单元的识别等。近年来,有关单位相继在北方重要铀矿产区实施二维/三维地震勘探。吴曲波等在二连盆地齐哈日格图凹陷铀矿区开展三维地震勘探工作,查明矿区铀成矿有关的断裂、岩性、岩相等^[48-49]。梁建刚等在松辽

盆地大庆长垣南部开展二维地震勘探工作,在层位划分、砂体圈定及古河道识别与推断等铀储层方面取得较深入的认识^[50]。颜新林在松辽盆地钱家店铀矿区的地震剖面中识别了呈树枝状的辉绿岩脉体,佐证了该区铀矿体与辉绿岩有密切的空间位置关系^[33]。实践表明,地震勘探技术应用于砂岩型铀矿尚存在一些难以解决的问题:① 铀矿产出深度不利于地震信号采集^[51]。砂岩型铀矿产出深度多在100~800 m之间,远不及油气勘探的深度。浅层信号覆盖次数低且环境噪声干扰大,给地震数据采集和处理带来一定困难的同时,还对地震资料的分辨率产生较大影响。② 含矿砂岩与围岩物性差异小,探测精度难以达到要求^[51]。实际勘查结果表明,铀矿化对砂岩的粒度无选择性,在不同粒度的砂岩乃至泥岩中皆可产出铀矿化,但铀矿物/铀多以吸附态赋存在岩石粒度减小或粘土矿物增加的部位。如此岩性差异,决定了含矿砂岩与围岩的物性差异小,限制了地震勘探对铀储层的精细识别。③ 地震勘探成本高。与油气勘探相比,砂岩型铀矿勘探成本低廉,实施地震勘探所需经费较高。目前,仅局限于一些部门在铀矿及其邻近区域开展地震勘探工作,难以在此类铀矿找矿中得到广泛推广应用。因此,有必要注重面向同盆成藏的油气、煤炭勘探的地震资料的二次利用。鉴于煤炭与铀储层相近/相邻的事实,对于面向煤炭勘探的地震资料,应注重铀储层岩性、岩相的精细识别与追踪。对于面向油气勘探的地震资料,应注重断裂的识别以及构造事件对铀储层沉积演化制约所表征的信息的提取。尽管上述问题在一定程度上制约了地震勘探在砂岩型铀矿找矿应用和推广,但作为在沉积盆地能源矿产勘探最有效的地球物理方法,地震勘探在查明砂岩型铀矿成矿环境方面仍取得较理想的效果。笔者对松辽盆地西南部铀矿区及其附近采集的地震剖面开展了大量的地质解译工作,深刻认识到在厘清区域和矿区地质的基础上,结合砂岩型铀矿成矿理论,注重钻孔(包括地球物理测井)资料与地震剖面的对比和精细解译,能够切实有效地挖掘地震资料所蕴含的铀成矿信息。

3.3 电(磁)勘探

电(磁)法勘探是基于电磁感应原理来勘查地下介质不均匀性的地球物理方法,其在金属、煤炭、油气、地下水等能源矿产勘查以及环境与工程勘察等领域得到广泛应用^[52,49]。目前,电(磁)勘探主要被用于查明沉积建造、基底起伏以及断裂等铀成矿环境,其与地震勘探所能揭示的地质特征类型基本

相同。与地震勘探相比,利用电(磁)法勘探获取的成果资料的精度相对低,但野外作业相对经济。为弥补勘探精度的不足,铀矿地质工作者多采用联合其他地球物理方法的组合工作方式。

目前,面向砂岩型铀矿的电(磁)法勘探方法主要为可控源音频大地电磁测深法(CSAMT法),其次为电磁成像测深技术和自然电位法^[14,53]。CSAMT法是利用人工发射源来获取地下地质信息的一种方法,其通过控制人工发射源的信号强度和频率来提高采集数据的信噪比和勘探深度。目前,该方法在砂岩型铀矿找矿与勘探中的应用较为广泛。李英宾等联合CSAMT法和浅层地震对比揭示了松辽盆地西南部铀矿产区储铀层及其邻近层位、断裂的空间分布以及基底的埋深情况^[14]。王伟等联合CSAMT法与土壤氡气测量法在内蒙古巴音杭盖地区查找到较好的铀矿化线索,并与钻孔资料对比揭示了有利砂体的厚度和产出位置^[54]。大地电磁频率域测量系统同时采用人工电磁场和天然电磁场两种场源,具有观测时间短、可快速密点连续测量等优势。该方法曾在海拉尔盆地、松辽盆地开展实验性探索,在查明断裂构造、基底形态、地层产状和砂体的空间展布等方面取得良好效果^[39]。层间氧化带依据矿物组合和地球化学特征可划分为氧化带、氧化—还原过渡带和原生带3个亚带。由于不同带中的溶液化学成分存在差别,形成了层间氧化带砂岩型铀矿特有的自然电位异常,即中间高、两边低的特征。产出在氧化—还原过渡带的铀矿体对应自然点异常的高值位置。早期,该方法在伊犁盆地铀产区开展了实验研究,取得了一定效果^[53]。汤洪志等在新疆伊犁盆地南缘扎吉斯坦铀矿、库捷尔太铀矿以及吐哈盆地十红滩铀矿等地开展实验性研究,取得较理想的效果^[53]。

3.4 重磁勘探

重磁勘探是利用地下地质体密度、磁性差异来研究其分布规律的地球物理方法。区域和地面高精度重磁数据已在研究深部地质问题中得到广泛应用。与其他地球物理方法相比,早期重磁勘探在砂岩型铀矿找矿与勘探中的应用较少,但近年有关研究成果愈加多见报道。重磁勘探可应用于查明有利铀成矿的断裂、岩浆岩的空间分布以及基底的埋深和起伏形态等,且具有勘探深度大、工作效率高、工作限制条件较少等优点。在区域重磁探测方面,封志兵等发现砂岩型铀矿多位于重力场值由高向低变化的梯度带,且等值线发生同形扭曲或错断的位置,这是铀矿形成于构造斜坡带位置且受控于断裂所

致^[11]; 马小雷等、刘燕戎等分别基于鄂尔多斯盆地南缘、松辽盆地西部斜坡的区域重磁数据分析了断裂、背斜、岩浆岩等控铀成矿要素, 并据此圈定有利勘探区^[29,55]。在铀矿勘探区, 王彦国等利用 CG-5 重力仪在二连盆地齐哈日格图地区开展高精度重力测量, 经数据处理获得了 6 条重力剖面, 了解了区内沉积建造与基底起伏之间的关系, 为钻孔布置提供有益参考; 识别了断裂, 为区内热流体叠加成矿的观点提供支撑^[13]。另外, 在氧化带, 铁以三价的含铁矿物存在, 其磁性整体较弱; 但在还原带, 磁黄铁矿、菱铁矿、钛磁铁矿等二价含铁矿物含量增多。因此, 富集铀矿的氧化—还原过渡带处于磁场强度由弱变强的过渡部位, 这一特性是高精度磁测应用于砂岩型铀矿找矿的理论基础^[56]。然而, 有效磁测数据容易被基底、沉积地层等引起的磁异常干扰, 在一定程度上影响了该方法的有效实施, 有必要发展相适应的数据处理技术。

对区域重磁场数据进行处理和解释, 揭示区域尺度上的断裂、基底起伏和岩石岩性特征, 可作为优选有利勘探区的参考; 在铀矿勘探区, 高精度地面重磁探测能够精细地揭示上述地质特征。结合现有钻孔等地质资料, 可对钻孔布设提供有益参考。目前, 有关单位已在北方沉积盆地的边缘部署并实施了大量铀矿勘探工作, 但在盆地内部却少有探索。松辽盆地西南部盆内隆起钱家店铀矿的发现表明, 盆地内部隆起区也具有良好的铀成矿潜力。该铀矿除产出在盆内隆起外, 还广泛发育深大断裂^[24]。因此, 重磁勘探在盆地内部查找“钱家店”式砂岩型铀矿具有一定优势。

4 地球物理方法勘探效果对比和方法组合

4.1 地球物理勘查方法效果对比

根据砂岩型铀矿找矿与勘探的应用效果, 可将地球物理勘查方法分为 2 类, 即直接找矿和查明成矿环境。地球物理测井是一种直接将仪器置入井中测量岩层地球物理特性的方法。其避免了地面各种噪音的干扰, 在直接定位铀矿、查明铀成矿环境等方面的效果尤为突出, 且是目前用于计算铀资源量的主要方法。在直接找矿方面, 磁法勘探和放射性勘查方法在理论上可被应用于直接定位铀矿体。然而, 采集的有效信息往往湮没在背景噪声中难以提取, 且影响因素多, 不确定性较大。在查明铀成矿环境方面, 各地球物理方法各有侧重。在铀源评价方面, γ 能谱测量是行之有效的方法, 其中航空 γ 能谱

测量效率较高; 在查明断裂方面, 地震勘探的效果较理想, 重、磁、电等地球物理勘查方法相对经济; 在含铀目的层的精细探测和空间展布圈定方面, 地震勘探当属首选, 在与钻孔资料对比约束下效果更佳; 在查明盆地基底岩性和起伏形态等方面, 在物性资料的约束下对区域重磁数据反演是有效且经济的方法, 可作为有利勘探区优选的重要参考。

4.2 地球物理勘查方法组合

前已述及, 表征于地表的砂岩型铀矿信息十分微弱, 且铀储层物性差异不明显, 限制了地球物理勘查方法的有效开展。为确保其应用效果, 有必要在地球物理勘查方法的选择、测线布置、数据处理和解释等全过程紧密结合已有地质信息。此外, 综合地球物理勘查方法是避免地质解释多解性问题, 提高勘探效率的有效方法。

产出在我国北方东、西部的砂岩型铀矿的成矿特征存在较为明显的差别。自中新世代以来, 我国西北处于挤压抬升的构造环境^[57]。已探明的砂岩型铀矿多产于盆地边缘的斜坡带, 成矿模式以层间氧化型为主^[58-59]。鉴于此, 放射性、重力和电法勘探是较理想的地球物理方法组合。其中, 利用航空 γ 能谱测量开展铀源条件评价和查找具有放射性异常的露头; 利用区域重力场数据揭示斜坡基底起伏形态。因上覆沉积层的产出特征往往对基底具有继承性, 故分析基底形态和可能的铀源区位置, 可初步判断地下水流向。结合已有地质资料, 圈定有利勘探区。在有利勘探区, 以钻孔资料为约束, 利用电法勘探查明有利含铀砂体、沉积相和断裂的空间展布。历史时期, 我国东北部曾处于拉张伸展的构造环境, 并形成一系列的裂陷盆地^[60-61]。该类型的盆地往往形成较大规模的古河谷。其中, 毗邻的酸性火成岩隆起是理想的铀源区, 同样需要利用放射性勘查方法开展铀源条件评价和查找具有放射性异常的露头; 勘探实践表明, 古河谷内铀储层沉积建造对铀成矿控制明显。因此, 需要利用浅层地震勘探并在钻井的对比约束下精细刻画铀储层。有研究表明, 基底隆起、深部断裂也是古河谷内铀成矿的控制因素, 可利用区域重力数据开展相关研究。因此, 放射性、重力和地震勘探是较理想的地球物理方法组合。近年来, 有学者注意到盆地内部同样具有一定的铀成矿潜力^[62]。盆地内部隆起控制上覆地层的发育和地下水的流动, 并可能为铀成矿提供部分铀。可利用区域重磁数据进行约束反演, 揭示基底起伏和不同类型岩石的空间分布情况, 并圈定酸性火成岩隆起区作为有利勘探区。另外, 有利铀成矿的盆地内

部隆起区及其邻近区域往往断裂较为发育。可利用浅层地震勘探查明断裂、目的层的空间展布情况等(表1)。

对于具体铀矿找矿区,应根据当地地质条件,综合铀源、构造、沉积建造等控矿因素和各地球物理方法的特点,选择合适的地球物理方法(组合)。另

外,重磁数据可用于查明找矿区基底起伏、岩石岩性和断裂的空间展布等,可为盆地内部有利勘探区的优选和后期地质、地球物理勘探工作的布置提供依据。因此,在今后的此类铀矿找矿与勘探中,重磁勘探应在铀矿找矿与勘探前期工作中得到足够的重视。

表1 不同类型铀矿床特征及其适用地球物理方法

Table 1 Characteristics of various sandstone-type uranium deposits and their corresponding geophysical methods

成矿模式	产出位置	典型铀矿	控矿因素	地球物理勘查方法
层间氧化带型	盆缘斜坡	伊犁盆地南缘系列铀矿	沉积建造 铀源 断裂 基底起伏	航空 γ 能谱测量 CSAMT法 区域重力场数据处理与解释
古河谷型	盆缘/盆内裂谷	二连盆地古河道系列铀矿	沉积建造 铀源 基底起伏 断裂	航空 γ 能谱测量 浅层地震勘探 重力勘探
盆地内部	盆地内部隆起	松辽盆地西南部系列铀矿	基底起伏 断裂 沉积建造	区域重磁场数据处理与解释 浅层地震勘探

5 结论

1) 地球物理方法在查明沉积建造、断裂、地质体岩性和基底起伏等方面有优势,可用于开展铀成矿环境评价。

2) 为确保地球物理方法在砂岩型铀矿找矿与勘探中的应用效果,需要在方法选择、测线布置、数据处理和解释等的全过程紧密结合已有地质信息。

3) 不同地球物理方法各具优势和不足,应立足区域和勘探区地质条件,结合控矿因素,选择合适的地球物理方法(组合)。

4) 重磁数据可为盆地内部有利勘探区的优选和后期地质、地球物理勘探工作的布置提供依据,应在砂岩型铀矿找矿与勘探工作中得到足够的重视。

参考文献(References):

- [1] 张金带,李子颖,苏学斌,等.核能矿产资源发展战略研究[J].中国工程科学,2019,21(1):113-118.
Zhang J D, Li Z Y, Su X B, et al. Development strategy of nuclear energy mineral resources [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(1): 113-118.
- [2] 张金带.我国砂岩型铀矿成矿理论的创新和发展[J].铀矿地质,2016,32(6):321-332.
Zhang J D. Innovation and development of metallogenic theory for sandstone-type uranium deposit in China [J]. Uranium Geology, 2016, 32(6): 321-332.

- [3] 邓军,王庆飞,高帮飞,等.鄂尔多斯盆地演化与多种能源矿产分布[J].现代地质,2005,19(4):538-545.
Deng J, Wang Q F, Gao B F, et al. Evolution of Ordos Basin and its distribution of various energy resources [J]. Geoscience, 2005, 19(4): 538-545.
- [4] 朱西养.层间氧化带砂岩型铀矿元素地球化学特征——以吐哈伊犁盆地铀矿床为例[D].成都:成都理工大学,2005.
Zhu X Y. The elements geochemistry characteristics of interlayer oxidation zone in sandstone type uranium deposits: A case study of the uranium deposit in Yili basin and Turpan-Hami Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005.
- [5] Feng Z B, Nie F J, Deng J Z, et al. Spatial-temporal collocation and genetic relationship among uranium, coal, and hydrocarbons and its significance for uranium prospecting: A case from the Mesozoic-Cenozoic uraniferous basins, North China [J]. Russian Geology and Geophysics, 2017, 58(5): 611-623.
- [6] 张成勇,聂逢君,刘庆成,等.二连盆地巴彦乌拉地区砂岩型铀矿目的层电测井曲线响应分析[J].铀矿地质,2010,26(2):101-107,119.
Zhang C Y, Nie F J, Liu Q C, et al. Discussion on electrical logging response of target layer for sandstone-type uranium deposits of Bayanwula area, Erlan basin [J]. Uranium Geology, 2010, 26(2): 101-107,119.
- [7] 张成勇,聂逢君,刘庆成,等.二连盆地巴彦乌拉地区砂岩型铀矿目的层电测井曲线响应分析[J].铀矿地质,2010,26(2):101-107,119.
Zhang C Y, Nie F J, Liu Q C, et al. Discussion on electrical logging response of target layer for sandstone-type uranium deposits of Bayanwula area, Erlan basin [J]. Uranium Geology, 2010, 26(2): 101-107,119.
- [8] 邓刘敏,葛祥坤,刘章月,等.松辽盆地西南部 DL 铀矿带铀赋存状态及矿物组成特征[J].铀矿地质,2021,37(2):192-204.

- Deng L M, Ge X K, Liu Z Y, et al. The occurrence and mineral composition of uranium ore of DL mineralized zone in southwestern Songliao Basin [J]. *Uranium Geology*, 2021, 37(2) : 192–204.
- [9] 袁桂琴,熊盛青,孟庆敏,等.地球物理勘查技术与应用研究[J].*地质学报*,2011,85(11) : 1744–1805.
- Yuan G Q, Xiong S Q, Meng Q M, et al. Application research of geophysical prospecting techniques [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(11) : 1744–1805.
- [10] 孙龙德,方朝亮,撒利明,等.地球物理技术在深层油气勘探中的创新与展望[J].*石油勘探与开发*,2015,42(4) : 414–424.
- Sun L D, Fang C L, Sa L M, et al. Innovation and prospect of geophysical technology in the exploration of deep oil and gas [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(4) : 414–424.
- [11] 封志兵,聂逢君,江丽,等.重力场特征与砂岩型铀矿的关系及地质意义[J].*现代地质*,2014,28(4) : 841–849.
- Feng Z B, Nie F J, Jiang L, et al. Correlation of gravity field characteristics with sandstone-type uranium deposit and its geological significance [J]. *Geoscience*, 2014, 28(4) : 841–849.
- [12] 付锦,赵宁博,刘涛.高精度磁测预测砂岩铀矿氧化带前锋线[J].*物探与化探*,2017,41(1) : 41–51.
- Fu J, Zhao N B, Liu T. The prediction of the front of the sandstone uranium deposit oxidation zone based on high-precision magnetic measurement [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41(1) : 41–51.
- [13] 王彦国,刘鹏,聂逢君,等.重磁勘探方法在砂岩型铀矿中的应用[J].*东华理工大学学报: 自然科学版*,2017,40(1) : 42–46.
- Wang Y G, Liu P, Nie F J, et al. Applications of gravity and magnetic methods in sandstone-type Uranium deposits [J]. *Journal of East China University of Technology: Natural Science Edition*, 2017, 40(1) : 42–46.
- [14] 李英宾,李毅,魏滨,等.CSAMT 和浅层地震在松辽盆地西南部铀矿勘查中的应用[J].*地质与勘探*,2019,55(6) : 1442–1451.
- Li Y B, Li Y, Wei B, et al. Application of CSAMT and shallow seismic reflection to uranium exploration in southwestern Songliao Basin [J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(6) : 1442–1451.
- [15] 王浩锋,刘波,陈霜,等.综合物探测量在二连盆地沉积岩型铀矿勘查中的应用[J].*地质与勘探*,2019,55(1) : 127–134.
- Wang H F, Liu B, Chen S, et al. Application of integrated geophysical surveys to exploration of sedimentary rock type uranium in the Erlian basin [J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(1) : 127–134.
- [16] 刘祜,刘章月,柯丹,等.层间氧化带砂岩型铀矿床的高精度磁测定位技术研究[J].*铀矿地质*,2009,25(5) : 296–302.
- Liu H, Liu Z Y, Ke D, et al. Study on positioning technique of interlayer oxidation zone sandstone hosted uranium deposit based on high resolution magnetic survey [J]. *Uranium Geology*, 2009, 25(5) : 296–302.
- [17] 陈戴生,李晓翠.陆相盆地古水动力条件与铀成矿关系[J].*铀矿地质*,2014,30(4) : 219–222,251.
- Chen D S, Li X C. Analysis of the relationship between paleo-hydrodynamic condition and uranium mineralization in the continental basin [J]. *Uranium Geology*, 2014, 30(4) : 219–222, 251.
- [18] Min M Z, Chen J, Wang J, et al. Mineral paragenesis and textures associated with sandstone-hosted roll-front uranium deposits, NW China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2005, 26(1–2) : 51–69.
- [19] 吴柏林.中国西北地区中生代盆地砂岩型铀矿地质与成矿作用[D].西安: 西北大学,2005.
- Wu B L. Geology and metallogeny of sandstone-hosted uranium deposit in Meso-cenozoic basin, NE China [D]. Xi'an: Northwest University, 2005.
- [20] 孙泽轩,陈洪德,陈勇,等.潜水层间氧化带砂岩型铀矿特征与成矿模式——以滇西地区山间盆地为例[J].*矿床地质*,2006, 25(2) : 191–198.
- Sun Z X, Chen H D, Chen Y, et al. Characteristics and metallogenic models of phreatic interlayer oxidation zone sandstone-type uranium deposits: Case study of intermontane basins in Western Yunnan Province [J]. *Minerals Deposits*, 2006, 25(2) : 191–198.
- [21] Hou B H, Keeling J, Li Z Y. Paleovalley-related uranium deposits in Australia and China: A review of geological and exploration models and methods [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 88: 201–234.
- [22] 刘池洋,邱欣卫,吴柏林,等.中—东亚能源矿产成矿域基本特征及其形成的动力学环境[J].*中国科学: 地球科学*,2007, 37(S1) : 1–15.
- Liu C Y, Qiu X W, Wu B L, et al. Evolution of Ordos Basin and its distribution of various energy resources [J]. *Geoscience: Earth Science*, 2007, 37(S1) : 1–15.
- [23] 聂逢君,林双幸,严兆彬,等.尼日尔吉达地区砂岩中铀的热流体成矿作用[J].*地球学报*,2010,31(6) : 819–831.
- Nie F J, Lin S X, Yan Z B, et al. Hydrothermal mineralization of uranium in sandstone, Teguida, Niger [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2010, 31(6) : 819–831.
- [24] 聂逢君,严兆彬,夏菲,等.内蒙古开鲁盆地砂岩型铀矿热流体作用[J].*地质通报*,2017,36(10) : 1850–1866.
- Nie F J, Yan Z B, Xie F, et al. Hot fluid flows in the sandstone-type uranium deposit in the Kailu basin, Northeast China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(10) : 1850–1866.
- [25] 王飞飞.油气煤铀同盆共存全球特征与中国典型盆地剖析[D].西安: 西北大学,2018.
- Wang F F. Characteristics of oil, gas, coal and uranium coexisting in the same basin worldwide and a case study of the Ordos Basin in China [D]. Xi'an: Northwest University, 2018.
- [26] 封志兵,聂逢君,严兆彬,等.松辽盆地西部斜坡铀成矿条件及聚铀模式[J].*大庆石油地质与开发*,2013,32(4) : 590–606.
- Feng Z B, Nie F J, Yan Z B, et al. Mineralizing conditions and metallogenic model of uranium in west slope of Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2013, 32(4) : 590–606.
- [27] 聂逢君,张成勇,姜美珠,等.吐哈盆地西南缘地区砂岩型铀矿含矿目的层沉积相与铀矿化[J].*地球科学*,2018, 43(10) : 3584–3602.
- Nie F J, Zhang C Y, Jiang M Z, et al. Relationship of depositional facies and microfacies to uranium mineralization in sandstone along the southern margin of Turpan-Hami Basin [J]. *Earth Science*,

- 2018, 43(10): 3584–3602.
- [28] 刘波, 苗爱生, 彭云彪, 等. 兴蒙地区中—新生代盆地铀成矿特征、机理及其动力学背景研究进展 [J]. 地质学报, 2020, 94(12): 3689–3711.
- Liu B, Miao A S, Peng Y B, et al. Research advances in uranium metallogenic characteristics, mechanism and dynamic background in the Mesozoic-Cenozoic basins of the Xingmeng area, North China [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(12): 3689–3711.
- [29] 刘燕戎, 路文芬, 杨冬红, 等. 基于重磁资料的铀矿预测研究——以松辽盆地西部为例 [J]. 地球学报, 2021, 42(1): 63–73.
- Liu Y X, Lu W F, Yang D H, et al. The prediction of uranium deposit based on gravity and magnetic data: Exemplified by Western Songliao Basin [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(1): 63–73.
- [30] 吴仁贵, 胡志强, 巫建华, 等. 富铀地质体与成矿铀源关系探讨 [J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2018, 41(4): 358–363.
- Wu R G, Hu Z Q, Wu J H, et al. Relationship between rich uranium geological body and source of uranium mineralization [J]. Journal of East China University of Technology: Natural Science, 2018, 41(4): 358–363.
- [31] 李西得, 刘军港. 二连盆地卫镜岩体风化作用地球化学特征研究 [J]. 铀矿地质, 2020, 36(5): 336–345.
- Li X D, Liu J G. Study on weathering feature of Weijing pluton in Erlian Basin, Inner Mongolia [J]. Uranium Geology, 2020, 36(5): 336–345.
- [32] 吴柏林, 孙斌, 程相虎, 等. 铀矿沉积学研究与发展 [J]. 沉积学报, 2017, 35(5): 1044–1053.
- Wu B L, Sun B, Cheng X H, et al. Study and prospect for sedimentology of uranium deposit [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(5): 1044–1053.
- [33] 颜新林. 松辽盆地钱家店地区上白垩统辉绿岩特征及铀成矿作用 [J]. 东北石油大学学报, 2018, 42(1): 40–48.
- Yan X L. Characteristics and uranium mineralization of upper cretaceous diabase in Qianjiadian area, Songliao Basin [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2018, 42(1): 40–48.
- [34] 吴慧山, 谈成龙. 我国核地球物理勘查的若干新进展 [J]. 地球物理学报, 1997, 40(S1): 317–325.
- Wu H S, Tan C L. Several new advances in nuclear geophysical exploration in China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1997, 40(S1): 317–325.
- [35] 李必红, 程纪星, 杨龙泉, 等. 放射性物探在相山盆地深部火成岩型铀矿勘查中的应用 [J]. 世界核地质科学, 2017, 34(3): 161–166, 179.
- Li B H, Cheng J X, Yang L Q, et al. Application of radioactive geophysical exploration for the deep volcanic rock type uranium deposit exploration in Xiangshan basin [J]. World Nuclear Geoscience, 2017, 34(3): 161–166, 179.
- [36] 张凯, 付锦, 龚育龄, 等. 主要放射性物探方法在砂岩型铀矿勘查中的应用分析 [J]. 世界核地质科学, 2015, 32(1): 46–50.
- Zhang K, Fu J, Gong Y L, et al. Analysis on application of major radioactive geophysical methods for sandstone type uranium deposits [J]. World Nuclear Geoscience, 2015, 32(1): 46–50.
- [37] 胡航, 蒋喆, 李世龙, 等. 土壤氡气测量在二连盆地马尼特拗陷南缘 EG 地区的应用 [J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(12): 67–70.
- Hu H, Jiang Z, Li S L, et al. Application of soil radon measurement in Engerz area, Southern Manit depression, Erenhot Basin [J]. Coal Geology of China, 2018, 30(12): 67–70.
- [38] 杨龙泉, 李必红, 赵丹, 等. 铀矿体上方均匀覆盖层中氡迁移的数值模拟 [J]. 铀矿地质, 2020, 36(5): 441–452.
- Yang L Q, Li B H, Zhao D, et al. Numerical simulation for radon migration in the homogeneous overburden layer above uranium ore body [J]. Uranium Geology, 2020, 36(5): 441–452.
- [39] 韩绍阳, 侯惠群, 腰善丛, 等. 我国可地浸砂岩型铀矿勘查方法技术研究 [J]. 铀矿地质, 2004, 20(5): 306–314.
- Han S Y, Hou H Q, Yao S C, et al. Study of techniques for prospecting and exploration of in-situ leachable sandstone-type uranium deposits in China [J]. Uranium Geology, 2004, 20(5): 306–314.
- [40] 郭福生, 辜骏如. 能谱特征参数 $\overline{\text{Th}}/\overline{\text{U}}$ 与 $\overline{\text{Th}}/\overline{\text{U}}$ 之差异及古铀量计算公式的修正 [J]. 铀矿地质, 1997, 13(6): 356–358, 374.
- Guo F S, Gu J R. The difference between spectral characteristic parameter $\overline{\text{Th}}/\overline{\text{U}}$ and $\overline{\text{Th}}/\overline{\text{U}}$ and the revised formula for calculating paleo-uranium abundance [J]. Uranium Geology, 1997, 13(6): 356–358, 374.
- [41] 刘庆成. 铀矿地面物化探的发展与应用 [J]. 世界核地质科学, 2004, 21(1): 38–45.
- Liu Q C. Technology development of uranium geophysical and geochemical exploration and its application [J]. World Nuclear Geoscience, 2004, 21(1): 38–45.
- [42] 赵宁博, 付锦, 刘涛, 等. 地形对砂岩型铀矿氡气测量的干扰作用及其修正方法 [J]. 物探与化探, 2017, 41(4): 667–671.
- Zhao N B, Fu J, Liu T, et al. The terrain interference to radon measurement in sandstone-type uranium deposit and its correction method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(4): 667–671.
- [43] 赵宁博, 付锦, 刘涛. 伊犁盆地南缘砂岩型铀矿航磁特征分析及信息增强 [J]. 地球物理学进展, 2017, 32(2): 553–558.
- Zhao N B, Fu J, Liu T. Aeromagnetic characteristic analysis and information enhancement of sandstone-type uranium deposit in the southern margin of Yili basin [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(2): 553–558.
- [44] 黄笑. 砂岩型铀矿钻孔测井相特征与铀成矿关系 [D]. 南昌: 东华理工大学, 2017.
- Huang X. Study on the relationship between drill logging characteristics and uranium mineralization in sandstone-type uranium deposit [D]. Nanchang: East China University of Technology, 2017.
- [45] 汤彬, 吴永鹏, 张雄杰, 等. 高精度能谱测井与 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 特征 γ 射线的“直接铀定量”技术 [J]. 核技术, 2012, 35(10): 745–750.
- Tang B, Wu Y P, Zhang X J, et al. High precision energy spectrum logging and direct uranium quantification technique for $^{234\text{m}}\text{Pa}$ characteristic gamma rays [J]. Nuclear Techniques, 2012, 35(10): 745–750.
- [46] 王卫国, 宫文杰, 姜山, 等. 二连盆地乌尼特地段铀矿勘探中的测井资料分析 [J]. 铀矿地质, 2010, 26(6): 365–368.

- Wang W G, Gong W J, Jiang S, et al. Analysis of logging data for uranium exploration in Wunite segment, Erlian basin [J]. Uranium Geology, 2010, 26(6): 365–368.
- [47] 李宝华. 煤田测井在砂岩型铀矿勘查选区中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2014, 26(9): 81–84.
- Li B H. Application of coalfield logging in the exploration and selection of sandstone-type uranium deposits [J]. Coal Geology of China, 2014, 26(9): 81–84.
- [48] 吴曲波, 曹成寅, 李子伟. 准噶尔盆地五彩湾地区砂岩型铀矿地震勘探技术[J]. 物探与化探, 2018, 42(6): 1134–1143.
- Wu Q B, Cao C Y, Li Z W. The seismic exploration technology of the sandstone-type uranium deposit in Wucuiwan area of Junggar Basin [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(6): 1134–1143.
- [49] 吴曲波, 李子伟, 潘自强, 等. 砂岩型铀矿地震勘探中若干问题研究[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(5): 2097–2106.
- Wu Q B, Li Z W, Pan Z Q, et al. Study on some problems in the seismic exploration of sandstone type uranium deposits [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(5): 2097–2106.
- [50] 梁建刚, 杨为民, 孙大鹏, 等. 二维地震勘探在大庆长垣南端砂岩型铀矿勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2020, 44(6): 1322–1328.
- Liang J G, Yang W M, Sun D P, et al. The application of 2D seismic exploration to the exploration of sandstone-type uranium deposits at the southern end of Daqing placanticline [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1322–1328.
- [51] 吴曲波, 黄伟传, 乔宝平, 等. 砂岩型铀矿三维地震勘探采集关键技术及效果[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(6): 2239–2249.
- Wu Q B, Huang W C, Qiao B Q, et al. Key acquisition technology of 3D seismic exploration for sandstone-type uranium deposits and its applied results [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(6): 2239–2249.
- [52] 汤洪志, 邓居智. 电法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2015.
- Tang H Z, Deng J Z. Electrical exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015.
- [53] 汤洪志, 刘庆成, 苏兆锋, 等. 可地浸层间氧化带砂岩型铀矿自然电场形成机理及自然电位异常模拟与应用[J]. 铀矿地质, 2006, 22(3): 168–176.
- Tang H Z, Liu Q C, Su Z F, et al. Formation mechanism of self-potential at ISL-amenable interlayer oxidation zone sandstone-type uranium deposit and the simulation and application of self-potential anomalies [J]. Uranium Geology, 2006, 22(3): 168–176.
- [54] 王伟, 黄玉龙, 刘波, 等. CSAMT 与土壤氡气测量在砂岩型铀矿勘查中的应用: 以内蒙古巴音杭盖地区为例[J]. 地质与勘探, 2019, 55(5): 1241–1249.
- Wang W, Huang Y L, Liu B, et al. Application of the CSAMT method and soil radon measurement in surveys for sandstone-type uranium deposits: An example of the Bayinhangai area, Inner Mongolia [J]. Geology and Exploration, 2019, 55(5): 1241–1249.
- [55] 马小雷, 袁炳强, 许文强, 等. 鄂尔多斯盆地南缘重磁场特征及其与砂岩型铀矿关系[J]. 地质与勘探, 2016, 52(4): 647–656.
- Ma X L, Yuan B Q, Xu W Q, et al. The relationship between features of gravity and magnetic field and sandstone-type uranium deposits in the south of Ordos Basin [J]. Geology and Exploration, 2016, 52(4): 647–656.
- [56] 江民忠, 张积运, 石岩, 等. 微航磁异常与可地浸砂岩型铀矿床[J]. 铀矿地质, 2007, 23(5): 298–304.
- Jiang M Z, Zhang J Y, Shi Yan, et al. Weak-aeromagnetic anomaly and in-situ leachable sandstone-type uranium deposit [J]. Uranium Geology, 2007, 23(5): 298–304.
- [57] 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 等. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用[J]. 矿床地质, 2006, 25(5): 521–541.
- Hou Z Q, Pan G T, Wang A J, et al. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting [J]. Mineral Deposits, 2006, 25(5): 521–541.
- [58] Cheng Y H, Wang S Y, Jin R S, et al. Global Miocene tectonics and regional sandstone-style uranium mineralization [J]. Ore Geology Reviews, 2019, 106: 238–250.
- [59] 程银行, 张天福, 曾威, 等. 中国北方中生代盆地砂岩型铀超常富集的驱动力[J]. 大地构造与成矿学, 2020, 44(4): 590–606.
- Cheng Y H, Zhang T F, Zeng W, et al. Driving forces for Sandstone-type Uranium super enrichment in Meso-Cenozoic Basins, North China [J]. Geotectonica et Metallogenic, 2020, 44(4): 590–606.
- [60] 张岳桥, 赵越, 董树文, 等. 中国东部及邻区早白垩世裂陷盆地构造演化阶段[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 123–133.
- Zhang Y Q, Zhao Y, Dong S W, et al. Tectonic evolution stages of the early Cretaceous rift basins in Eastern China and adjacent areas and their geodynamic background [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3): 123–133.
- [61] 刘波, 时志强, 彭云彪, 等. 中国北方兴蒙地区叠合盆地砂岩型铀成矿特征及勘查方法综述[J]. 地质与勘探, 2019, 55(6): 1343–1355.
- Liu B, Shi Z Q, Peng Y B, et al. Review on metallogenic characteristics and exploration methods of sandstone-type uranium deposits in superimposed basins in the Xingmeng area, northern China [J]. Geology and Exploration, 2019, 55(6): 1343–1355.
- [62] 秦明宽, 何中波, 刘章月, 等. 准噶尔盆地砂岩型铀矿成矿环境与找矿方向研究[J]. 地质论评, 2017, 63(5): 1255–1269.
- Qin M K, He Z B, Liu Z Y, et al. Study on metallogenic environments and prospective direction of sandstone type uranium deposits in Junggar Basin [J]. Geological Review, 2017, 63(5): 1255–1269.

Application progress of geophysical methods in exploration of sandstone-type uranium deposit

FENG Zhi-Bing^{1,2,3}, NIE Bing-Feng², NIE Feng-Jun³, JIANG Li², XIA Fei³, LI Man-Gen³,
YAN Zhao-Bin³, HE Jian-Feng¹, CHENG Ruo-Dan²

(1. Jiangxi Engineering Laboratory on Radioactive Geoscience and Big Data Technology, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. School of Geophysics and Measurement-Control Technology, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 3. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Sandstone-type uranium deposits are the main type of uranium resources in China. Geophysical exploration methods are widely used to explore energy and mineral resources such as oil, gas, and coal in sedimentary basins, and they should also play an important role in the exploration of sandstone-type uranium deposits. Based on actual exploration conditions, this paper explores the current application status, existing problems, and development trends of geophysical exploration methods from the aspects of the metallogenic theory and ore-controlling factors of sandstone-type uranium deposits. In practical application, geophysical logging plays an important role in the direct positioning of uranium deposits and the quantitative calculation of uranium content per square meter, while the surface geophysical methods enjoy advantages in ascertaining uranium metallogenic environments such as sedimentary suites, faults, the lithology of rock masses, and basement relief. To ensure the application effects of geophysical exploration methods, it is necessary to closely combine the existing geological information in the whole process of method selection, survey line arrangement, and data processing and interpretation. Meanwhile, it is also necessary to select comprehensive geophysical exploration methods as required by actual conditions. It should be emphasized that the gravity and magnetic data can provide bases for the selection of optimal exploration areas inside basins and the arrangement of geological and geophysical exploration in the late stage. Therefore, enough attention should be paid to them in the prospecting and preliminary exploration work of uranium deposits.

Key words: sandstone-type uranium deposit; radioactive prospecting; geophysical methods; interlayer oxidation zone

(本文编辑: 王萌)